

Technical Article

隔离式偏置变压器寄生电容对 EMI 性能的影响



Pradeep Shenoy

小型隔离式电源可在电动汽车牵引逆变器、工厂控制模块等各种应用中跨越隔离屏障提供电力。本《电源设计小贴士》将剖析不同的隔离式偏置电源拓扑及其电磁干扰 (EMI) 性能。如您所见，隔离式变压器两端的寄生电容是导致共模噪声传播的主要因素。

在牵引逆变器中，栅极驱动器会驱动大功率开关（通常为绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 或碳化硅 (SiC) MOSFET），实现高压电池与电机之间的能量转换（见图 1）。栅极驱动器通常采用隔离设计，其 IC 的一部分连接低压域（初级侧），另一部分连接高压域（次级侧）。栅极驱动控制信号来自初级侧的微控制器，通过隔离屏障传递至次级侧来控制功率开关的通断。

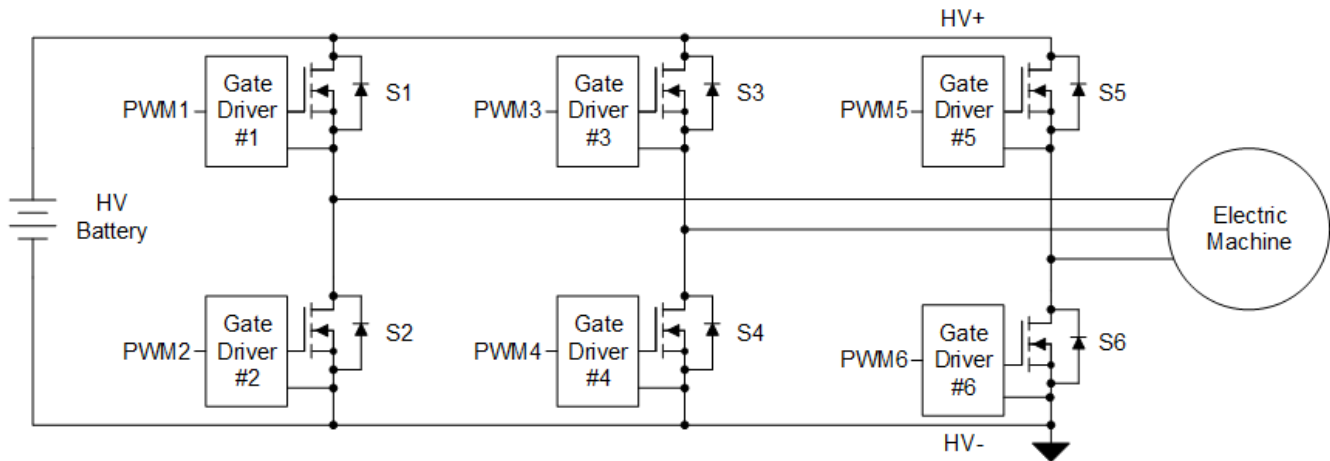


图 1. 采用隔离式栅极驱动器的牵引逆变器。来源：德州仪器 (TI)

隔离式栅极驱动器的次级侧需要一个隔离式电源来进行电源开关的导通和关断（见图 2）。

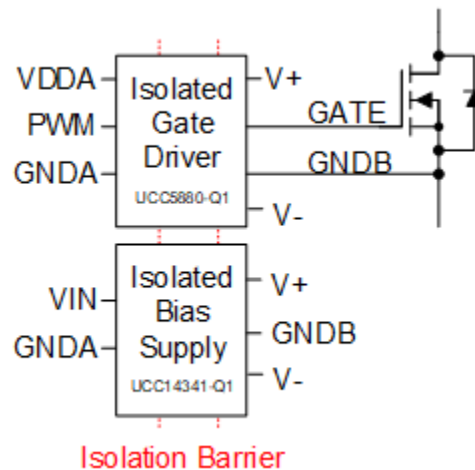


图 2. 隔离式偏置电源跨隔离屏障为隔离式栅极驱动器供电。来源：德州仪器 (TI)

隔离式偏置电源的额定功率通常相当低，不到 10W。可通过下面的公式估算其功率要求：

$$P_{DRV} = V_{DRV} \times Q_g \times F_{SW} \quad (1)$$

其中 V_{DRV} 是栅极驱动电压， Q_g 是开关栅极电荷， F_{SW} 是开关的开关频率（不是隔离式偏置电源开关频率）。栅极驱动电压取决于所选择的开关，但通常在正电源轨上为 +15V 至 +25V，在负电源轨上为 -8V 至 0V。

隔离式偏置电源的常见拓扑包括反激式、推挽式和电感器-电感器-电容器 (LLC)。一些全集成电源模块（封装内含变压器）在初级侧使用全桥配置。德州仪器 (TI) 的 LM5180-Q1 等反激式转换器具有很高的知名度，可提供良好的输出电压调节能力，效率极高，可设计为不使用光耦合器（使用初级侧调节），并且可提供多路隔离式输出。它们的缺点在于频率范围上受限 (<350kHz)，并且变压器尺寸较大。推挽式转换器（例如 TI 的 SN6507-Q1）和 LLC 转换器（例如 TI 的 UCC25800-Q1）结构简单，但没有闭环反馈。这会影响输出电压调节，可能需要前置稳压器和/或后置稳压器。集成式电源模块（例如 TI 的 UCC14341-Q1）可以调节输出电压，并且简单小巧，但它们的缺点是功率输出有限（通常小于 1.5W）并且比替代方案效率更低。

关于不同拓扑的 EMI 性能，您可能会疑问：特定拓扑对电磁兼容性结果的影响更大还是更小？为了解决这些问题，我们首先来考察一下隔离式变压器。变压器绕组之间确实存在一些寄生电容，当牵引逆变器开关节点 (V_{SW}) 在 HV+ 和 HV- 节点之间切换时，该电容会进行充电或放电。在开关切换期间，共模电流的短脉冲会对寄生电容充电或放电。共模电流与寄生电容和开关节点转换率 (dv/dt) 成正比。您可能已看到，氮化镓 (GaN) 和 SiC 等宽禁带半导体产生更大的电容或更快的开关节点转换率，从而导致更大的共模电流。图 3 突出显示了此寄生电容以及用于对其进行充电和放电的共模电流。

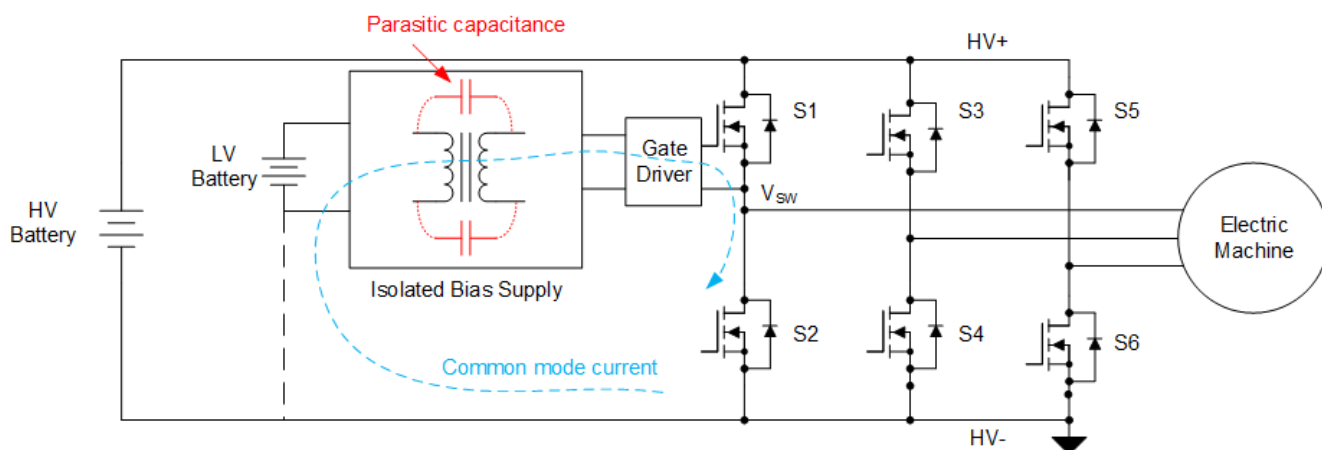


图 3. 当开关节点 (V_{SW}) 切换时，共模电流会为变压器寄生电容充电。来源：德州仪器 (TI)

转换器拓扑确实会影响变压器设计和由此产生的寄生电容。反激式转换器变压器（如果您更喜欢，也可称为耦合电感器）的设计在初级侧和次级侧之间实现强耦合，以降低漏感。漏感会导致缓冲器电路中出现不必要的电压尖峰和功率损耗。设计低漏感的不利影响在于，绕组间电容通常会增加，可以达到 20pF 或更高。与之相反，通过设计使 LLC 转换器可在其谐振元件中利用变压器的漏感。因此在设计变压器时无需刻意追求最小化漏感，其寄生电容可控制在 2pF 左右。如您所见，这有助于减少共模电流。

表 1 展示了对四种隔离式偏置拓扑研究中的一些参数，用于通过实验验证变压器寄生电容对共模电流的影响。所有转换器都设计用于 15V_{IN}、15V_{OUT}、1.5W 应用。每种拓扑的开关频率基于典型值，并相应地进行变压器设计。如您所见，反激式转换器变压器的漏感最低，寄生电容最高。LLC 转换器变压器具有最高的漏感和最低的寄生电容。

表 1. 四个隔离式偏置电源转换器示例的变压器参数。来源：德州仪器 (TI)

	SN6507-Q1 push-pull	UCC25800-Q1 LLC resonant	LM25180-Q1 flyback	UCC14131-Q1 module
Magnetizing inductance	196 μH (min)	67 μH (min)	27 μH (min)	N/A
Leakage inductance	0.56 μH	2.25 μH	0.3 μH	
Parasitic capacitance	6.5 pF	2.6 pF	21 pF	3.5 pF

对这些隔离式偏置电源拓扑的比较过程执行了广泛的测试：效率、负载调节、输入和输出纹波、热性能以及传导和辐射 EMI。为了关注系统中隔离接地之间测得的共模电流，我们的同事在两个接地之间连接了一根导线，并在 400V 时开启和关闭大功率开关（在本例中，是使用 LMG3522R030-Q1 的 GaN 半桥）时测量了共模电流。图 4 和图 5 分别显示了 40V/ns 和 100V/ns 高压开关节点转换率的结果。

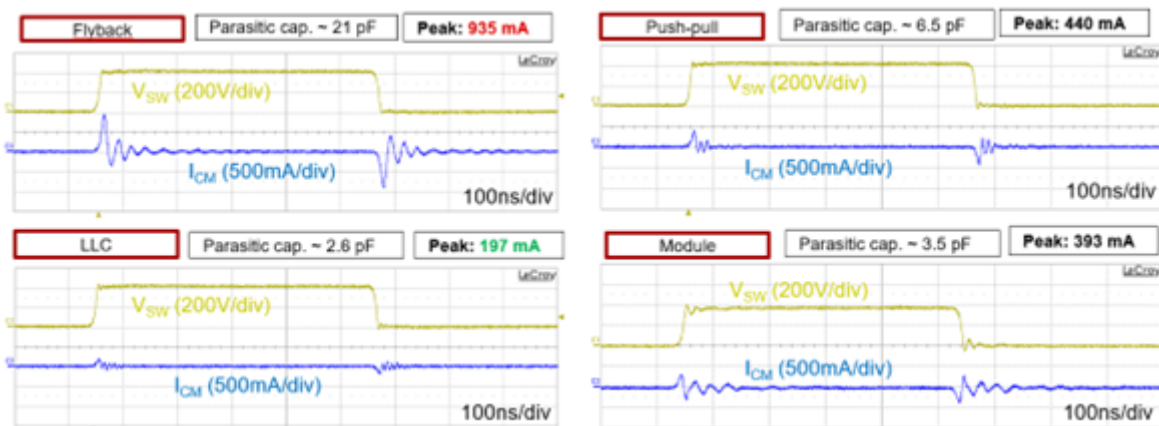


图 4. 开关节点上 40V/ns 转换率下的共模电流比较。通道 1 是高压开关节点 (200V/div)，通道 2 是共模电流 (500mA/div)。来源：德州仪器 (TI)

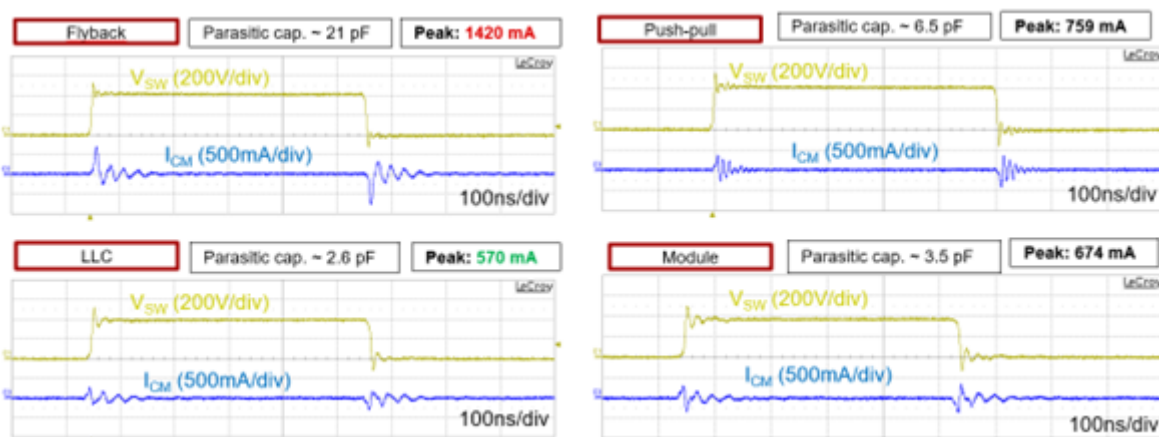


图 5. 开关节点上 100V/ns 转换率下的共模电流比较。通道 1 是高压开关节点 (200V/div)，通道 2 是共模电流 (500mA/div)。来源：德州仪器 (TI)

测量结果表明，反激式变压器的共模电流最大（在 40V/ns 和 100V/ns 转换率下分别为 935mA 和 1,420mA）。这是正常现象，因为该变压器具有最大的寄生电容。而且，由于 LLC 转换器具有最低的寄生电容，因此测得的共模电流最小（在 40V/ns 和 100V/ns 转换率下分别为 197mA 和 570mA）。大共模电流尖峰会产生不利影响，因为它们会将高压域的噪声传导至低压域，引发地弹噪声，并可能导致转换器运行不良（包括脉冲丢失、调节失效或意外关机）。

共模电流可能特别难以抑制。解决共模电流问题的最佳方法之一是从源头避免生成共模电流。虽然此处讨论的应用是电动汽车中的牵引逆变器，但该应用的原理也适用于并网转换器和服务器电源等应用。

相关内容

- [电源技巧 119：如何评估电源变压器的 EMI 性能](#)
- [电源技巧 118：使用交错接地平面改善隔离式电源噪声滤波](#)
- [电源技巧 117：在完全工作条件下进行测试之前测量 LLC 谐振回路](#)
- [电源设计小贴士 116：如何降低 PFC 的 THD](#)
- [电源技巧 115：GaN 开关集成如何在 PFC 中实现低 THD 和高效率](#)

其他资源

- [反激式变压器设计的效率和 EMI 注意事项](#)
- [隔离式栅极驱动器偏置电源设计注意事项](#)

先前已发布于 EDN.com 上。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月